



XIV Congresso Brasileiro  
de Pontes e Estruturas

## **Monitoração Dinâmica Remota Contínua e Identificação Modal da Ponte Costa e Silva**

**Ronaldo Oliveira de Almeida<sup>1</sup>, Guilherme Santana Alencar<sup>2</sup>, Graciela Nora Doz de Carvalho<sup>3</sup>, Luís Augusto Mendes Veloso<sup>4</sup>, José Luís Vital de Brito<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil / UnB / eng.ronaldo.almeida@gmail.com

<sup>2,3,5</sup> Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / UnB / guilherme.alencar@unb.br; graciela@unb.br; jlbrito@unb.br

<sup>4</sup> Departamento de Engenharia Mecânica / UnB / lveloso@unb.br

### **Resumo**

Construída entre 1969 e 1976, a Ponte Costa e Silva, ou Ponte Monumental como o próprio Oscar Niemeyer a batizou, é a única obra de Arte Especial (OAE) do renomado arquiteto projetada e executada. Até à sua conclusão, essa OAE passou por alteração em seu sistema construtivo, vez que o projeto original considerava a ponte construída integralmente em balanços progressivos de concreto protendido, tanto vãos laterais (110 m), como central (220 m). Após incidente com os cabos de protensão ocorrido em 1971, foi realizada uma adaptação ao projeto inicial, substituindo um trecho central de 58 metros de comprimento, por uma estrutura metálica ortotrópica. Além disso, em 1985, a ponte passou a ter três faixas de rolamento (originalmente eram duas) e duas tubulações adutoras sob os passeios de pedestres laterais. Diante desse contexto, considerando a utilização desse equipamento público e os efeitos do tempo, que podem interferir no comportamento dinâmico das estruturas, está sendo realizada uma monitoração dinâmica remota contínua do vão central da ponte, no âmbito de uma dissertação de mestrado. Essa monitoração, composta por cinco acelerômetros triaxiais, localizados em pontos de interesse, visa identificar os parâmetros modais da ponte, a partir dos dados obtidos experimentalmente, decorrentes de vibrações de caráter aleatório, e confrontá-los com os resultados determinados por meio de modelagem numérica (Métodos dos Elementos Finitos), desenvolvida no ambiente do programa computacional CSiBridge.

### **Palavras-chave**

Ponte de concreto; monitoração dinâmica remota contínua; análise modal; modelagem numérica; vibrações de caráter aleatório.

### **Introdução**

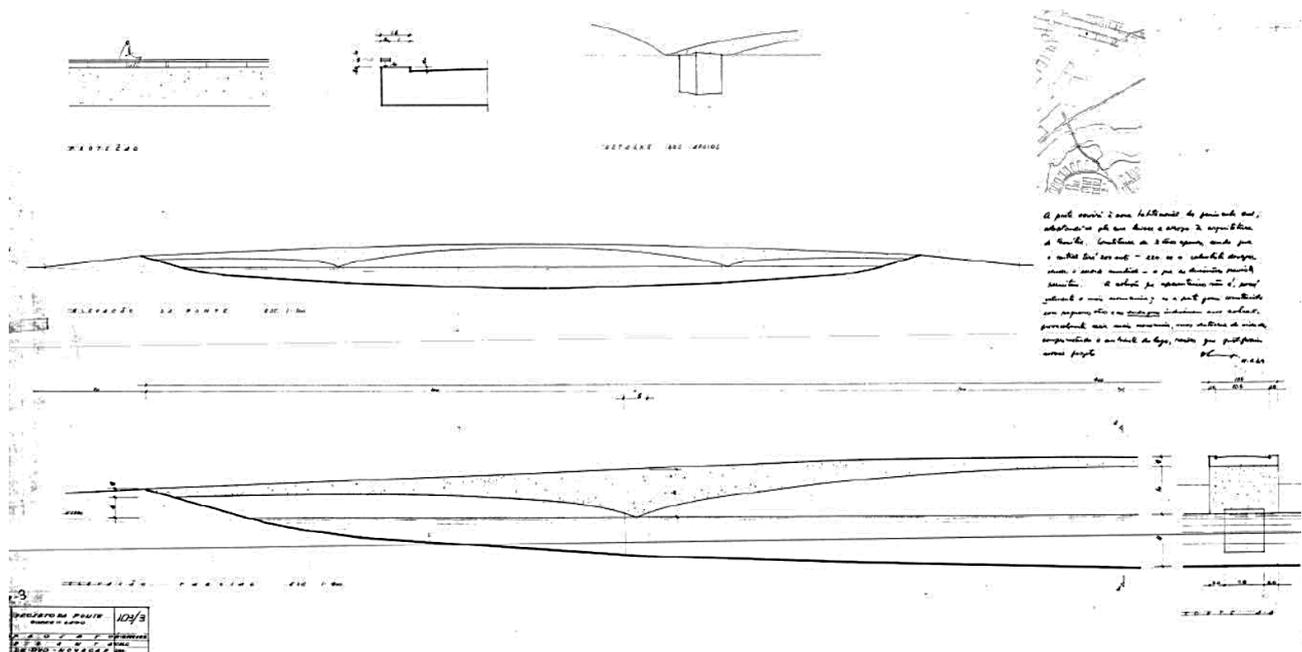
De acordo com Almeida (2010), a monitoração das estruturas é essencial para uma avaliação estrutural, quando se necessita determinar as características e as propriedades do sistema estrutural, quando se deseja acompanhar o desenvolvimento de um problema para entender melhor sua atuação em um caso específico e programar a manutenção, quando se deseja verificar a efetividade de um reparo, entre outros.

No caso da Ponte Costa e Silva, após problemas e modificações na sua concepção original à época da sua construção, a instalação de um sistema de monitoração remoto contínuo pode ser uma ótima oportunidade para conhecer seu comportamento estrutural, e, por meio de modelagem numérica, avaliar suas atuais condições estruturais. Além disso, a monitoração contínua permite coletar os dados em tempo real, podendo levar à detecção precoce de problemas estruturais, e a monitoração remota tem a capacidade reduzir custos de manutenção a longo prazo, reduzindo custos com deslocamentos até o local, além da facilidade de acesso aos dados coletados.

Dessa maneira, este artigo tem como finalidade apresentar o sistema de monitoração instalado, procedimentos utilizados e alguns resultados já adquiridos.

## Histórico e descrição da ponte

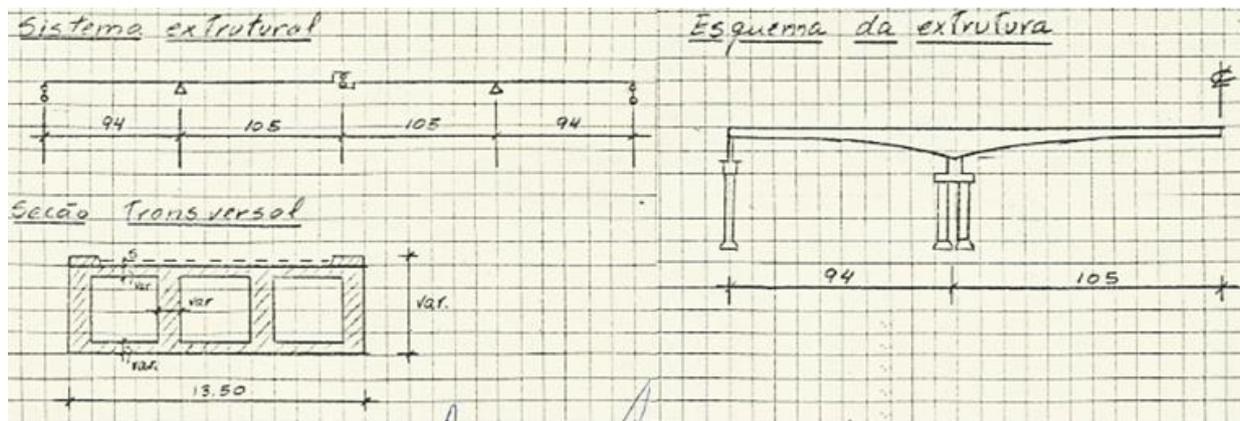
A Ponte Costa e Silva, projetada pelo arquiteto Oscar Niemeyer, em 1969, foi planejada para ligar o Setor Residencial da Península Sul, que hoje faz parte da Região Administrativa do Lago Sul, ao Plano Piloto de Brasília. Nas palavras de Niemeyer: “*A ponte deve apenas pousar na superfície, como uma andorinha tocando a água*”. Dessa maneira, o arquiteto previu uma ponte com um vão central esbelto de 200 metros e dois vãos laterais curtos de 100 metros e, em seu desenho, o arquiteto fez uma nota: “[*A ponte*] *constitui-se de 3 vãos apenas, sendo que o central terá 200 metros – 220 [metros] se o calculista desejar vencer o recorde mundial*”, Figura 1, a seguir.



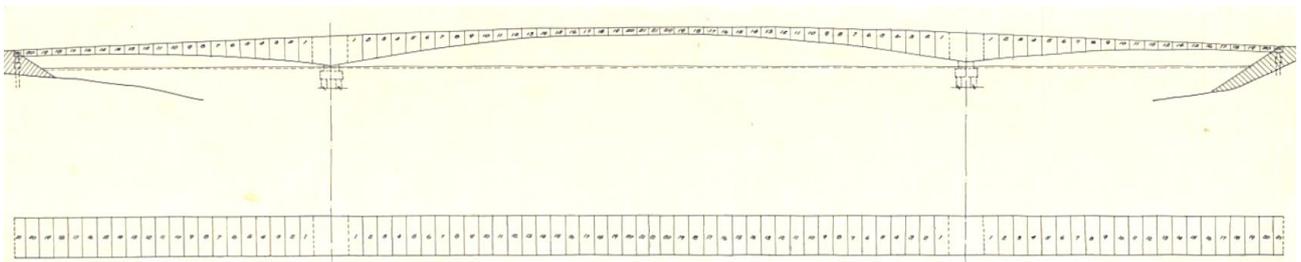
**Figura 1 – Projeto original de Oscar Niemeyer para a Ponte sobre o Lago (NOVACAP/DE/DVO, 1969).**

Dessa forma, a Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil – Novacap lançou o edital de concorrência pública, em 1969, com um anteprojeto compreendendo um vão central de 210 metros, dois vãos laterais de 94 metros e dois balanços laterais de 1 metro. Com essas dimensões, os dois vãos laterais seriam apoiados sobre um escoramento direto e o vão central seria construído em balanços progressivos, Figura 2.

No entanto, após sondagem do solo a execução da ponte conforme inicialmente idealizada foi inviabilizada, pois, diante da resistência inadequada do solo, a implantação dos blocos de fundação nas margens e nos aterros foi impossibilitada. Diante disso, a solução foi aumentar a ponte em 40 metros no seu comprimento total, resultando em 220 metros de vão central e 110 metros em cada vão lateral, permitindo que a estrutura se apoiasse em solo mais resistente, Figura 3. A técnica construtiva para desenvolver essa solução seria executar a obra em balanços progressivos, simetricamente, a partir dos dois pilares centrais (FONSECA, 2007).

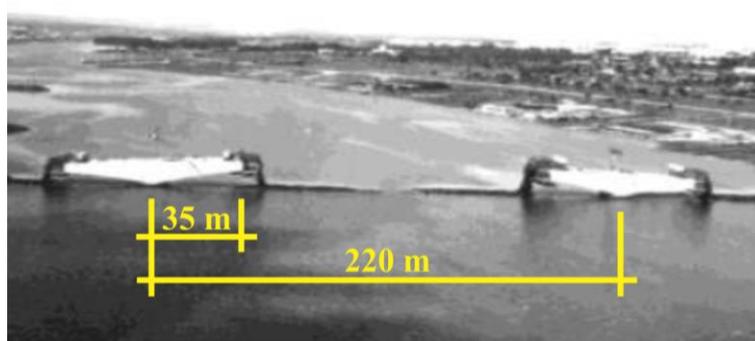


**Figura 2 – Esquema e Sistema Estrutural idealizado (adaptado) - Memória de Cálculo da Ponte sobre o Lago Paranoá (SOBRESCO S.A. - NOVACAP/DE/DVO, 1969).**

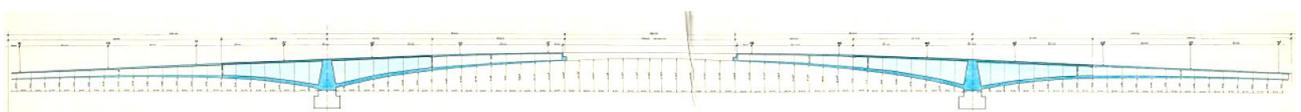


**Figura 3 – Projeto da Ponte sobre o Lago – Planta e Corte (NOVACAP/DE/DVO, 1970).**

Segundo Fonseca (2007), a construção da Ponte Costa e Silva foi iniciada em janeiro de 1970 e paralisada em junho de 1971, após a execução de 7 aduelas de 5 metros, em cada direção a partir dos apoios, Figura 4. Essa paralisação ocorreu após incidentes com os cabos de protensão e em razão da constatação, por engenheiros da Novacap, de que a quantidade de cabos de protensão calculada era insuficiente. A obra foi retomada em 1974, após redimensionamento da ponte e consequentes alterações no sistema estrutural original, passando a ter um trecho metálico em aço anticorrosivo (Corten) de 58,0 m de comprimento (320 toneladas), apoiado sobre dentes Gerber, aliviando a estrutura em 1/3 do peso do trecho, inicialmente em concreto, Figuras 5 e 6, a seguir.



**Figura 4 – Obra paralisada (adaptada, Arquivo Público do Distrito Federal, 1971).**

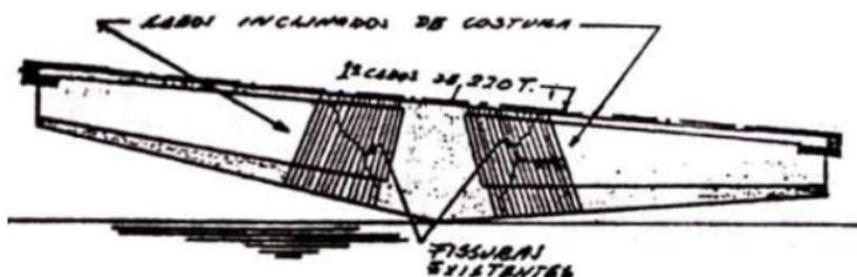


**Figura 5 – Projeto da Ponte Costa e Silva (modificada) – Seção Longitudinal da Superestrutura (NOVACAP/DU/DEP, 1976).**



**Figura 6 – Montagem mostrando a implantação do tabuleiro metálico de 58 m, no vão central (Arquivo Público do Distrito Federal, 1976).**

Além disso, outros reforços estruturais foram realizados, a saber: i) colocação de novos cabos de reforço de 200 tf e 300 tf nas células do tabuleiro; ii) injeção de fissuras e protensão externa vertical na região dos apoios centrais, Figura 6; e iii) reforço da fundação dos apoios centrais, com acréscimo de 4 tubulões metálicos, com seções diferentes, sendo um trecho inferior com diâmetro de 1,50 m e um trecho superior com diâmetro de 0,80 m, intertravados por vigas de concreto pré-moldado. A fundação original desses apoios era formada por bloco de concreto armado com dimensões 9,0x13,0x4,5 m, apoiado sobre seis tubulões em concreto, com 1,50 m de diâmetro. A ponte finalmente foi inaugurada em 6 de fevereiro de 1976, Figura 7, e se mantém em operação até hoje.

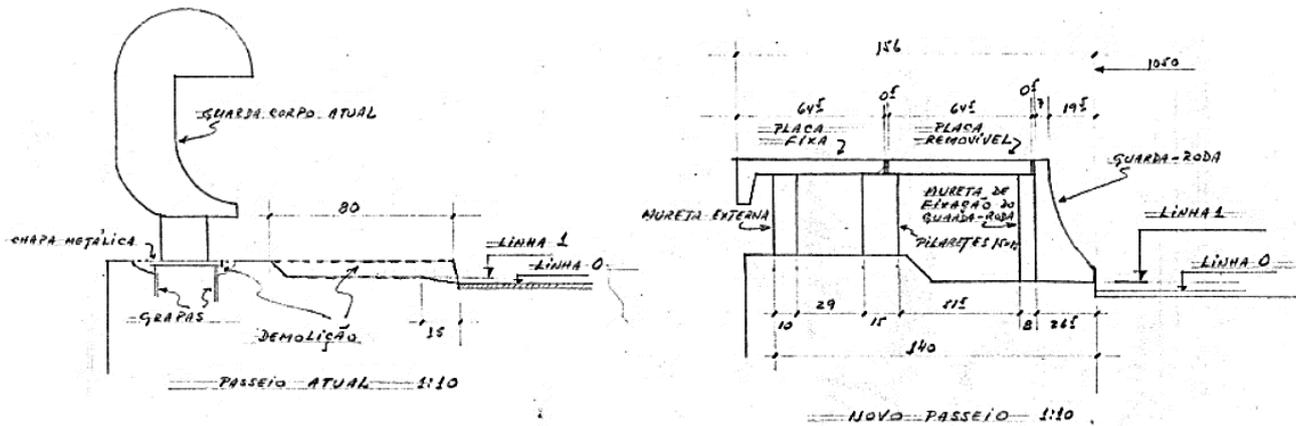


**Figura 7 – Reforço nos apoios centrais (Correio Braziliense, 1976, apud FONSECA, 2007).**

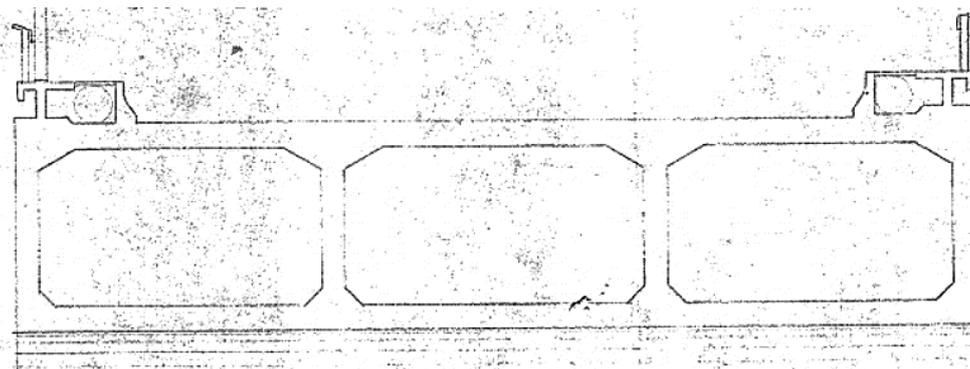


**Figura 8 – Inauguração da Ponte Costa e Silva, construída no Lago Paranoá e projetada por Oscar Niemeyer (Arquivo Público do Distrito Federal, 1976).**

A seção transversal do tabuleiro da ponte é composta por 3 células de 4,5 m de largura, resultando uma largura total de 13,5 m com altura variável, sendo 12 m nos apoios e 2,1 m no meio do vão. Essa largura compreendia originalmente dois passeios laterais para pedestres, um canteiro central e duas faixas de rolamento. Porém, em 1985, o passeio de pedestre foi elevado e passou a abrigar duas adutoras de água tratada, uma em cada lateral, com a finalidade de reforçar o abastecimento da Região Administrativa do Lago Sul, ora em expansão, e, aproveitando essa intervenção, as faixas de rolamento foram ampliadas para 3, divididas por tachões de sinalização horizontal, Figuras 9 e 10.



**Figura 9 – Modificações realizadas no passeio de pedestres para colocação das adutoras de água (NOVACAP/DE/DVO, 1985).**



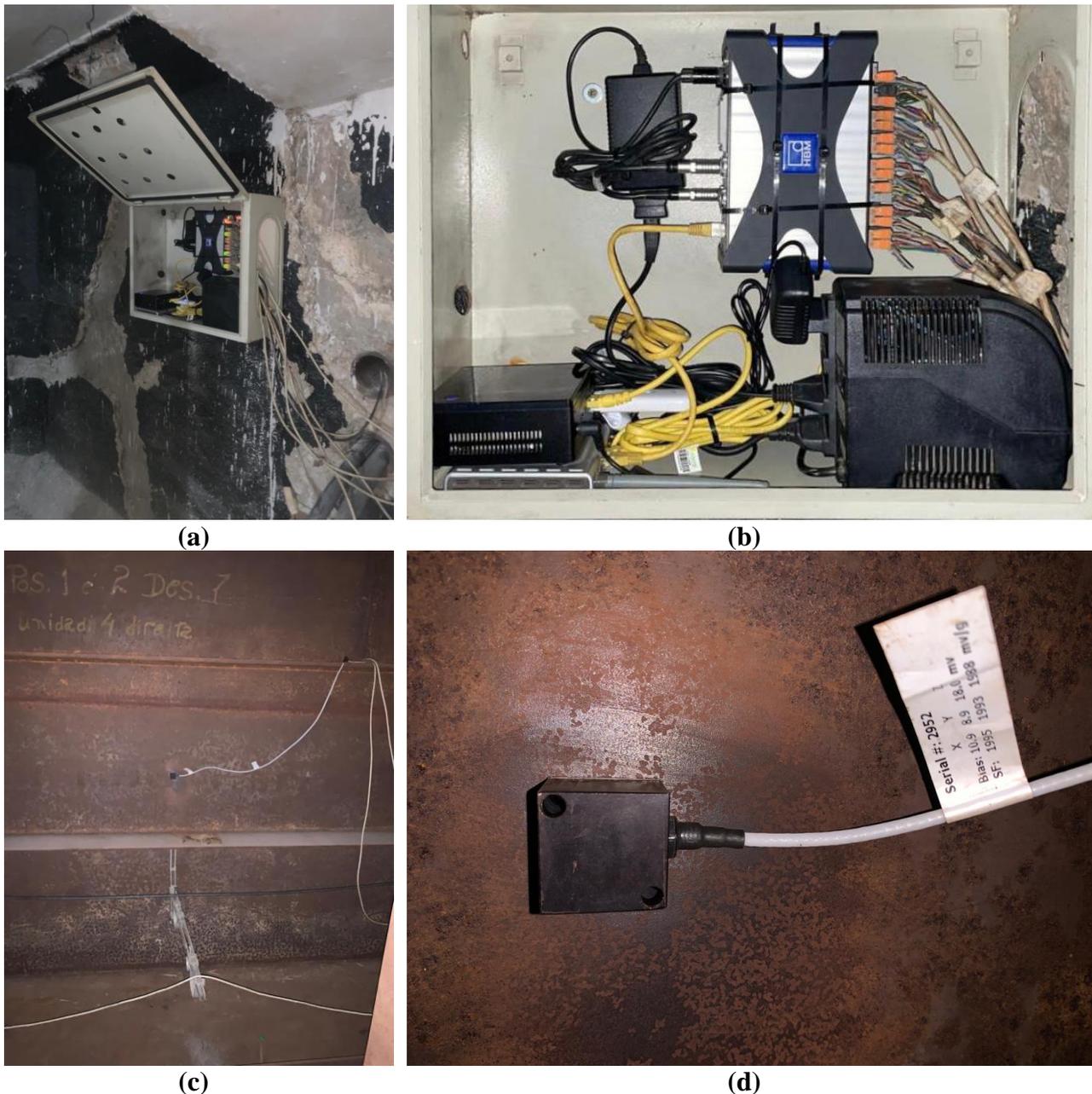
**Figura 10 – Seção transversal do tabuleiro modificada para abrigar adutoras de água (NOVACAP/DE/DVO, 1985).**

A partir de inspeções e monitorações realizadas entre 2014 e 2016, que identificaram, dentre outras manifestações patológicas, uma deflexão das pontas dos balanços do vão central, indicando possível perda de protensão dos cabos do tabuleiro da ponte, causada por processo de corrosão dos cabos ou perdas diferidas no tempo, o Governo do Distrito Federal contratou uma empresa de engenharia para executar obra de recuperação e reforço estrutural e revitalização da Ponte Costa e Silva, iniciada em março de 2021 e em execução até o momento. Sobre os serviços estruturais a serem realizados, destaca-se o reforço das vigas (longarinas), com o uso da protensão externa de seis cabos, dois por célula, constituídos por 27 cordoalhas engraxadas e plastificadas de sete fios de  $\varnothing 15,2$  mm, CP210RB (ALMEIDA, 2018).

### **Sistema de monitoração remota contínua da ponte**

O sistema de monitoração implantado na Ponte Costa e Silva tem como objetivo principal a avaliação do seu comportamento estrutural em serviço (vibrações de caráter aleatório), identificando seus parâmetros modais e frequências naturais, a partir dos dados enviados remotamente, via rede de telefonia móvel 4G. Esse sistema é composto, hoje, por: cinco acelerômetros triaxiais com capacidade 2g, em que  $g$  é a aceleração da gravidade, fixados em pontos de interesse no caixão metálico,

localizado no vão central, um módulo de aquisição de dados com 16 canais, mini PC, roteador de rede, modem de internet e estabilizador de energia, ver Figura 11.



**Figura 11 – (a) Localização do sistema de aquisição de dados; (b) Disposição dos equipamentos do sistema de aquisição de dados (c) Acelerômetro fixado na alma externa do caixão metálico (d) Detalhe do acelerômetro 2g.**

### **Plano de monitoração**

O plano de monitoração estrutural remota contínua da ponte foi dividido em cinco etapas, a saber: i) escolha dos pontos de interesse; ii) instalação dos sensores; iii) configuração do sistema; iv) coleta de dados e v) análise dos resultados. A localização dos acelerômetros foi definida levando em consideração as características da ponte, sua geometria, material e condições de carga. O próximo passo foi a fixação deles com precisão e sua conexão ao sistema de aquisição de dados. Em seguida, foi necessário configurar o sistema de monitoração para realizar a transmissão de dados remotos. O mini PC é o responsável por executar o programa de aquisição de dados, que recebe os sinais dos acelerômetros e os converte em sinais digitais, que serão transmitidos para o computador. O modem

de internet 4G permite que os dados sejam transmitidos e acessados de forma remota, em tempo real. O programa de aquisição de dados irá armazenar os dados em um arquivo, permitindo que os resultados sejam analisados posteriormente. A partir desses dados, serão realizadas a identificação dos modos de vibração, bem como das frequências naturais da ponte, o que permitirá a avaliação do seu comportamento estrutural.

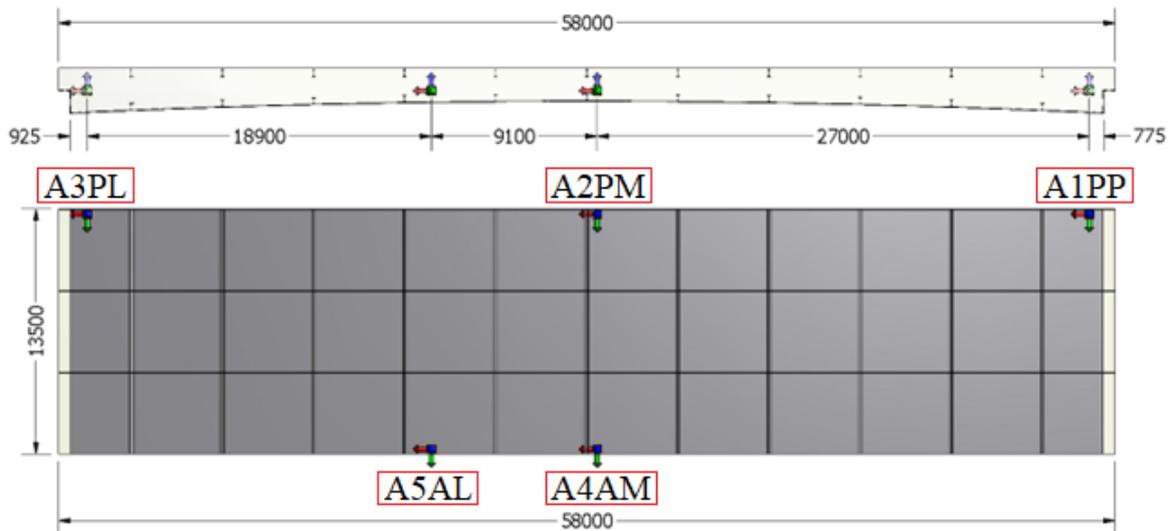


Figura 12 – Localização dos acelerômetros no interior do caixão metálico do vão central da Ponte Costa e Silva

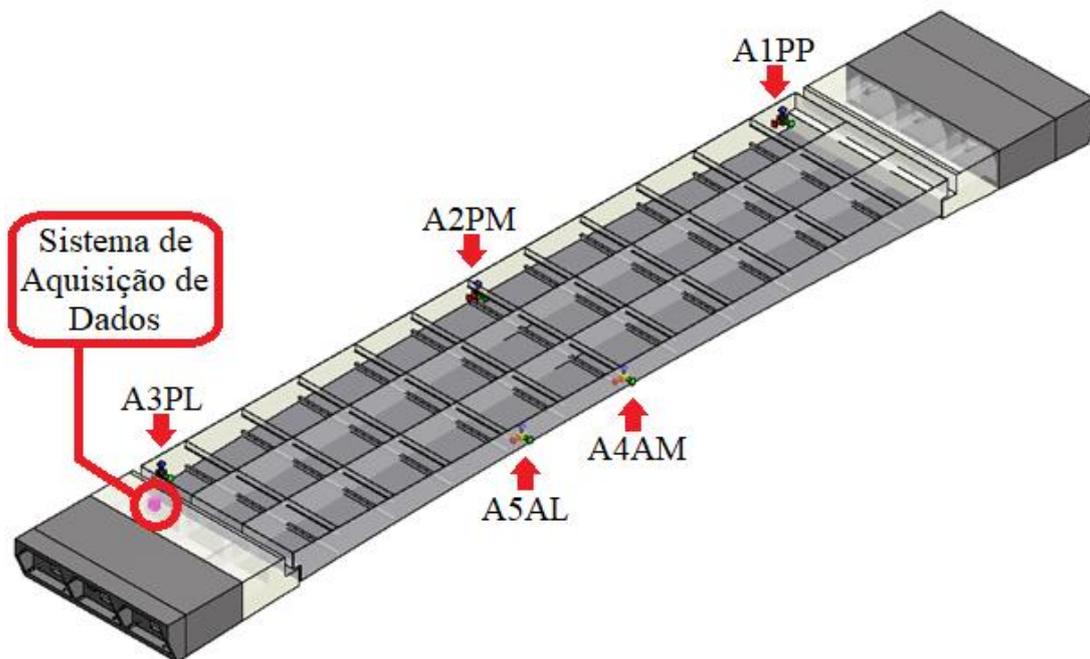
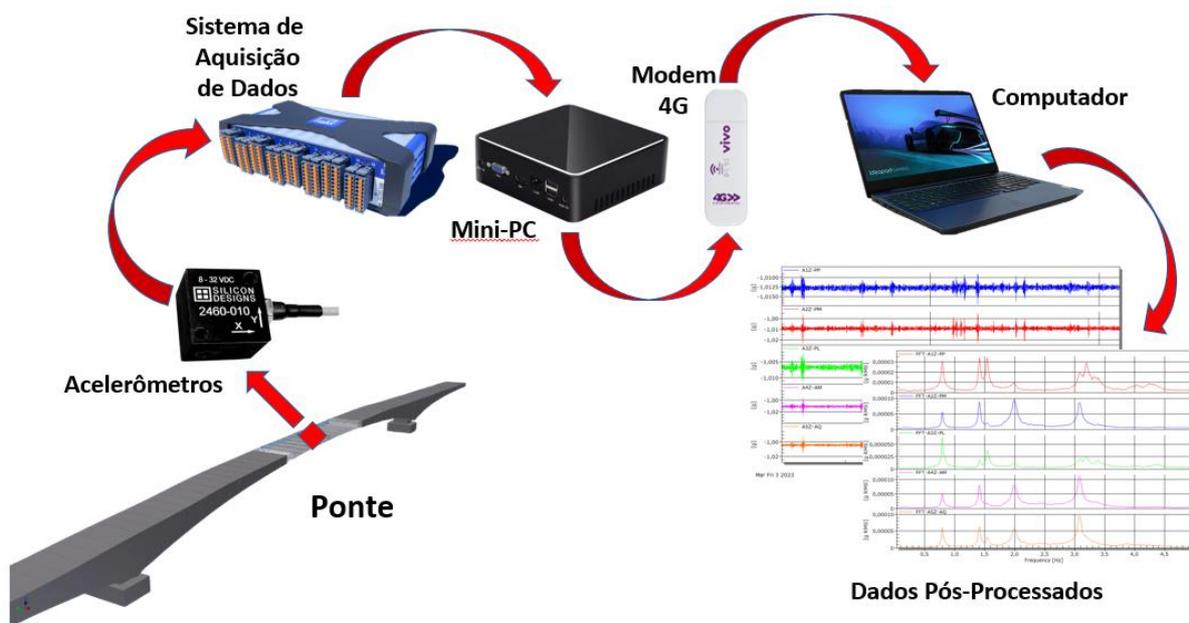


Figura 13 – Localização do sistema de aquisição de dados instalado na ponta do balanço e dos acelerômetros no vão central da Ponte Costa e Silva



**Figura 14 – Diagrama esquemático da monitoração contínua remota implantado da Ponte Costa e Silva**

**Tabela 1 – Características do módulo de aquisição de dados.**

Modelo	MX1601B (HBM)
Número de Canais	16
Taxa de Amostragem	Até 20.000 Hz por canal
Entradas de Medição	100 mV, 10 V, 60 V, 20 mA
Conversão A/D	24 bits (delta-sigma)
Classe de Precisão	Até 0,1
Largura de Banda de Sinal	Até 3 kHz

**Tabela 2 – Características dos acelerômetros triaxiais.**

Modelo	2460 MEMS DC Accelerometers
Capacidade	$\pm 2 g$
Sensibilidade	2.000 mV/g
Frequência de Resposta (Tip. 3 dB)	0 – 525 Hz
Choque mecânico máximo (0.1 ms)	2.000 g (pico)
Alimentação	8 - 32 VDC

**Tabela 3 – Características do mini PC.**

Processador	Intel Core i5-5200U (2,2 GHz / 3 MB / 7,5 W)
Memória RAM	4 GB
Armazenamento	SSD 128 GB
Processador Gráfico (GPU)	Intel HD 5500 (integrado)
Conectividade	Rede Ethernet / Sem Fio / USB 3.0
Sistema Operacional	Windows 10

**Tabela 4 – Características do modem de internet 4G**

Modelo	4G Wi-Fi ZTE MF79U
Categoria	LTE 4
Velocidade de recepção / emissão	Até 150 Mbps / 50 Mbps
Padrões Wi-Fi	802.11 b/g/n
Faixa de frequência Wi-Fi	2,4 GHz

## Formulação dinâmica para análise de vibração livre de modelos em elementos finitos

O problema da vibração livre de uma estrutura sem consideração de amortecimento reduz-se a equações de equilíbrio dinâmico do sistema com a presença apenas de forças inerciais D'Alembert e forças elásticas, na forma:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = 0 \quad (1)$$

Onde  $[M]$  e  $[K]$  são a matriz de massa e rigidez da estrutura, respectivamente, e as incógnitas são os deslocamentos,  $\{U\}$ , e as acelerações,  $\{\ddot{U}\}$ . Normalmente, o nível de discretização em elementos finitos de um modelo pode permitir a adoção de uma matriz de massa com massas concentradas nos nós ('*lumped mass*'), e forças inerciais apenas de translação, simplificando a matriz de massa (matriz de massa diagonal). O problema de vibração livre, representado pelo sistema de Equações lineares (1), ou seja, sem carregamento externo, corresponde a um sistema de equações homogêneo que, para possuir resposta diferente da trivial, deve ser avaliado como um problema de autovalor. Para estruturas de  $N$  graus de liberdade, a solução fornece  $N$  autovalores e  $N$  autovetores correspondentes. Nesse contexto, a solução da Equação (1) visa à determinação dos modos de vibração (autovetores) e frequências naturais (autovalores) de uma estrutura, que são características inerentes à própria estrutura e bastante importantes para o estudo do seu comportamento dinâmico. Assim, a Equação (1) pode ser reescrita com uma mudança de base para se traduzir em um problema de determinação de autovalores e autovetores (modos de vibrar), isto é, um autoproblema:

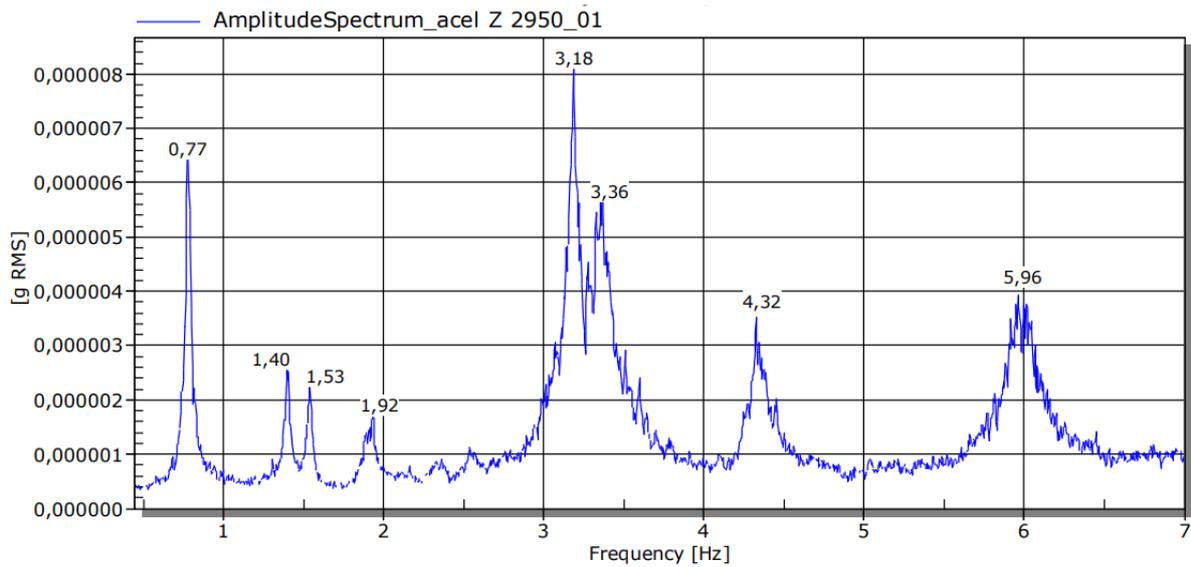
$$[K]\{\phi_i\} = \omega_i^2 [M]\{\phi_i\} \quad (2)$$

Onde  $\{\phi_i\}$  são os autovetores e  $\lambda_i = \omega_i^2$  são os autovalores (quadrado das frequências naturais circulares em rad/s). As frequências naturais em Hertz (1/s) são obtidas dividindo-se  $\omega$  por  $2\pi$ . Os autovetores  $\{\phi_i\}$  são também chamados de deslocamentos modais, e representam o deslocamento de certos graus de liberdade em relação a outros (deslocamento relativo adimensional), e não deslocamentos absolutos reais. Existem diversos algoritmos para solução da Equação (2), por exemplo o método de Lanczos, interação por subespaços, método de Jacobi e o método de Householder. Mais detalhes sobre os métodos de solução podem ser consultados na referência Bathe (2006).

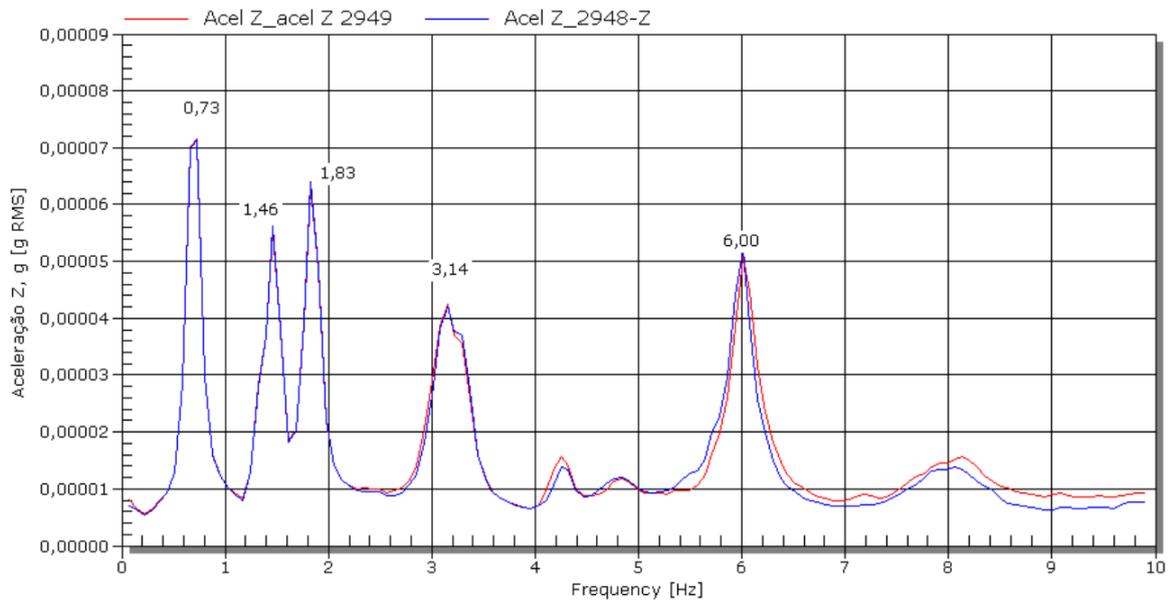
Nesse contexto, de acordo com o Manual de Referência de Análise da CSI (*Computers and Structures, Inc*), proprietária do CSI Bridge – programa empregado nesta dissertação de mestrado para construção do modelo em elementos finitos da Ponte Costa e Silva –, o respectivo programa resolve os pares de autovalores-autovetores usando um algoritmo de iteração de subespaço acelerado.

## Monitoração dinâmica estrutural do balanço do vão central em concreto protendido

Em 2018, foram realizadas cinco campanhas de monitoração estrutural da Ponte Costa e Silva para investigar a possível perda de protensão dos cabos do tabuleiro em concreto protendido, bem como avaliar sua integridade estrutural, após 40 anos em serviço e modificações em sua concepção original. O arranjo de instrumentação foi composto por dois acelerômetros triaxiais de 2g, instalados no eixo longitudinal (faixa central) da ponte, no balanço da margem do Lago Sul e no balanço da margem de Brasília (Plano Piloto) (Almeida *et al.*, 2020). As Figuras 15 e 16 abaixo exibem os Espectros em *Root Mean Square* (RMS) no domínio da frequência, com a identificação das frequências, calculadas pela Transformada Rápida de Fourier (FFT) e obtidas a partir do registro de acelerações adquirido na altura (Almeida *et al.*, 2020).



**Figura 15 – Frequências (FFT) das acelerações verticais (Z) no eixo da ponte no meio do balanço da margem do Lago Sul (Almeida *et al.*, 2020).**



**Figura 16 – Frequências (FFT) de acelerações verticais (Z) no eixo da ponte no meio do balanço da margem de Brasília (Almeida *et al.*, 2020).**

Conforme Almeida *et al.* (2020), para avaliar as repostas estruturais da ponte, foi desenvolvido um modelo numérico no ambiente do programa CSI Bridge v.20, visando avaliar os esforços solicitantes nas seções transversais protendidas e as deformadas modais, para a estimativa de rigidez do sistema estrutural. Em um primeiro momento, o tabuleiro foi representado por uma malha de elementos finitos, com o trecho central em aço, montado sobre aparelhos de apoio de 10eoprene e extremidades da ponte com articulação tipo pêndulo. Considerando o aumento das flechas dos balanços do vão central em razão das perdas progressivas de protensão em razão da relaxação do aço, da fluência do concreto e da ruptura de fios de protensão em razão da corrosão sob tensão que está presente nos cabos (evidências de infiltração das ancoragens), as frequências teóricas foram ajustadas aos valores obtidos experimentalmente, a partir de modificações nas condições de contorno do modelo, introduzindo uma articulação fixa na seção central, ou seja, considerando uma vinculação do trecho central para a transmissão da força normal. Com essa modificação as frequências naturais dos

primeiros modos foram aumentadas e atingiram a vizinhança dos resultados experimentais (ver Figura 17).

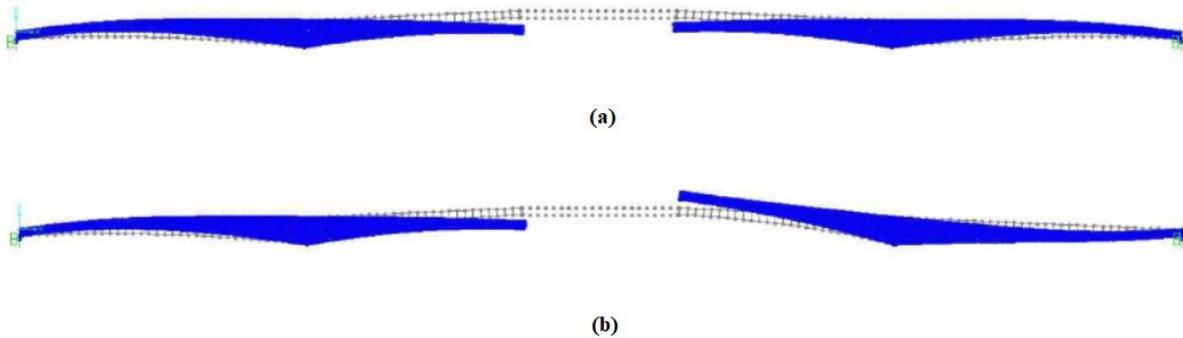


Figura 17 – Deformadas modais: (a) M2 - 0,402 Hz; (b) M3 - 0,426 Hz; (Almeida *et al.*, 2020).

### Monitoração remota contínua do tabuleiro metálico

No contexto de uma dissertação de mestrado, em novembro de 2022, visando implantar um sistema de monitoração dinâmica contínua remota, foram instalados cinco acelerômetros de 2 g em locais de interesse da Ponte Costa e Silva e ligados a um módulo de aquisição de dados, controlado por um mini PC, conectado a internet. A seguir, na Figura 18, estão apresentadas séries temporais das acelerações na direção vertical Z, com duração de 1 h, obtidas em 3 de março de 2023.

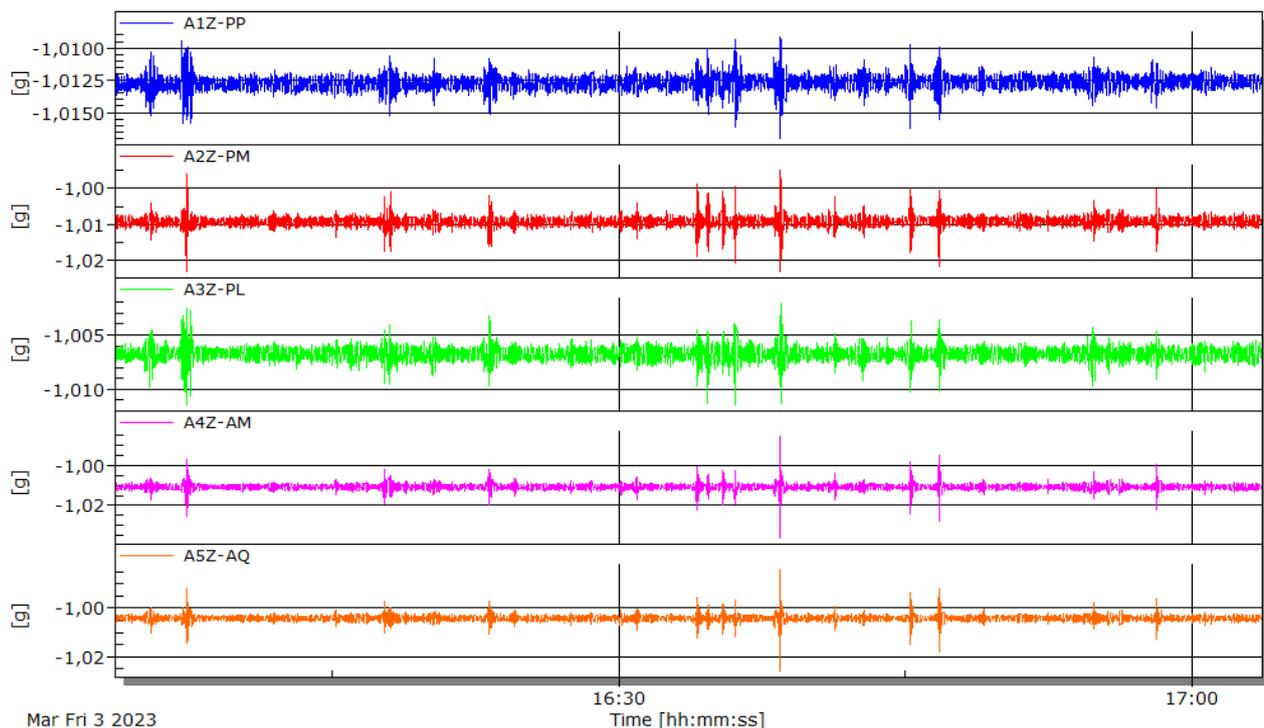
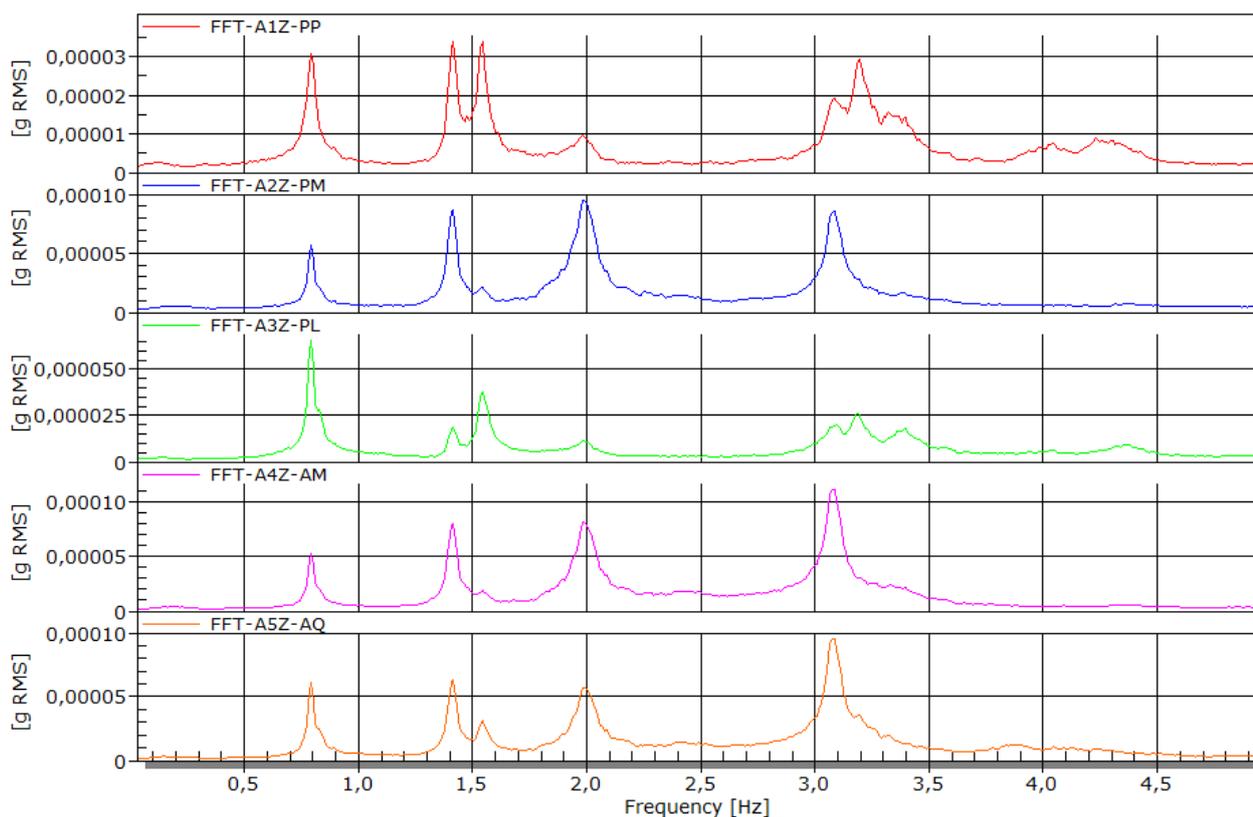


Figura 18 – Séries temporais das acelerações na direção z do caixão metálico localizado no meio do vão, medidas no dia 03/03/2023.

Na Figura 19, a seguir, estão mostrados Espectros em RMS no domínio da frequência, com a identificação das frequências na direção Z, calculadas pela Transformada Rápida de Fourier (FFT), a partir das séries temporais de aceleração supracitadas.



**Figura 19 – Espectros em RMS no domínio da frequência, identificação das frequências obtidas experimentalmente na direção Z, calculadas pela Transformada Rápida de Fourier (FFT): 0,79 Hz; 1,41 Hz; 1,53 Hz; 1,98 Hz; 3,07 Hz; 3,18 Hz.**

## Conclusões

O objetivo principal deste trabalho foi descrever o sistema de monitoração dinâmica contínua remota, instalado no interior da Ponte Costa e Silva, localizada sobre o Lago Paranoá, em Brasília, DF, que está ocorrendo dentro do contexto de uma dissertação de mestrado do Programas de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, da Universidade de Brasília, apresentando alguns resultados já obtidos, como as frequências do tabuleiro metálico do vão central, calculadas a partir de acelerações decorrentes de vibrações de caráter aleatório.

Com os resultados obtidos por este trabalho, percebeu-se uma aderência com os resultados obtidos por Almeida *et al.* (2020), quando estes investigaram o comportamento estrutural dinâmico dos trechos de concreto protendido em balanço, na região do vão central.

A monitoração dinâmica contínua remota de pontes é uma técnica essencial para identificação modal da estrutura e identificação de possíveis danos. Pela identificação modal, é possível determinar as frequências naturais e os modos de vibração da ponte, permitindo detectar mudanças na rigidez ou na massa estrutural. Com a monitoração contínua remota, é possível obter informações mais precisas sobre o comportamento da estrutura em diferentes condições, como sob tráfego intenso ou eventos ambientais adversos, além de oferecer vantagens como a redução dos custos operacionais e a melhoria da segurança, vez que os dados podem ser coletados sem a necessidade de interromper o tráfego ou colocar trabalhadores em risco e podem ser acessadas em tempo real.

Ressalta-se que a próxima etapa deste trabalho será a elaboração de um modelo numérico de própria autoria, bem como sua calibração, a partir dos resultados em campo, e a expansão da monitoração contínua remota para outros trechos da ponte.

## Referências

ALMEIDA, P. A. O. Monitoração de estruturas de concreto. Concreto: ciência e tecnologia. Vol. 2, 1º Ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, p. 201, 2011.

- ALMEIDA, P. A. O., HOLANDA, M. L. S., ALMEIDA, R. O. The Structural Rehabilitation of the Costa e Silva Bridge in Brasília, DF, Brazil. IABSE Congress – Resilient technologies for sustainable infrastructure, Christchurch, New Zealand, 2020.
- ALMEIDA, R. O. Especificações Técnicas dos Serviços de Recuperação e Reforço Estrutural e Revitalização da Ponte Costa e Silva. Procedimento Licitatório Eletrônico Nº 005/2020 – DILIC/DECOMP/DA/NOVACAP. Brasília, Distrito Federal, 2018.
- ARQUIVO PÚBLICO DO DISTRITO FEDERAL – ArPDF. Fundo Novacap I. Código Nov. B09. Ano, 1969-1971. Proc. 12610/69. Parte I, Caixa 158. Consultado em abril de 2014.
- ARQUIVO PÚBLICO DO DISTRITO FEDERAL – ArPDF. Fundo Novacap I. Código Nov. B09. Ano, 1969-1971. Proc. 12610/69. Parte II, Caixa 158. Consultado em abril de 2014.
- BATHE, K. J. Finite Element Procedures (Part 1-2), Massachussets: K. J. Bathe, 2006.
- FONSECA, R. P. A Ponte de Oscar Niemeyer em Brasília: Construção, Forma e Função Estrutural. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2007.
- COMPANHIA URBANIZADORA DA NOVA CAPITAL DO BRASIL - NOVACAP. Divisão de Obras (DVO) da Diretoria de Edificações (DE) da Novacap. Projetos originais da Ponte Costa e Silva. Ano 1969-1971. Consultados em março de 2014.
- COMPANHIA URBANIZADORA DA NOVA CAPITAL DO BRASIL - NOVACAP. Divisão de Obras (DVO) da Diretoria de Edificações (DE) da Novacap. Projetos originais da Ponte Costa e Silva. Ano 1974-1976. Consultados em março de 2014.